

塔式太阳能热发电腔式吸热器动态仿真模型

徐二树¹, 余强¹, 杨志平², 杨辰耀²

(1. 中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100190;

2. 华北电力大学能源与动力工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Solar Thermal Power Tower Cavity Receiver Dynamic Simulation Model

XU Ershu¹, YU Qiang¹, YANG Zhiping², YANG Chenyao²

(1. Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;

2. School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The water/steam superheated cavity receiver that is used for the MW Dahan solar thermal power tower demonstration plant was studied theoretically. A dynamic mathematical simulation model for the receiver was developed based on the three main section of the superheated cavity receiver. By simulating the dynamic and static characteristics of the receiver, a group of disturbance response curves on the radiation flux were given. The conclusions could be referred for the design of superheated cavity receivers and identification of the operational strategy of the solar thermal power tower plant.

KEY WORDS: solar thermal power; cavity receiver; model; simulation; dynamic characteristics

摘要: 以大汉 MW 级塔式太阳能热发电系统过热型腔式吸热器为研究对象, 采用模块化建模方法、根据吸热器的工作机制和热力学定律, 建立过热型腔式吸热器的全工况动态仿真数学模型。模拟大汉兆瓦级塔式太阳能热发电站过热型腔式吸热器的动、静态特性。给出大汉兆瓦级塔式太阳能热发电过热型腔式吸热器太阳辐照的阶跃扰动响应曲线, 得出的结论对塔式太阳能热发电电站过热型吸热器的设计、塔式太阳能热发电电站运行策略的制定具有一定的指导意义。

关键词: 太阳能热发电; 腔式吸热器; 模型; 仿真; 动态特性

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2006AA050101); 国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(2010CB227104)。

Project Supported by the National High Technology Research and Development of China (863 Program) (2006AA050101); The National Basic Research Program of China (973Program) (2010CB227104) .

0 引言

大汉电站是科技部在“十一五”期间设立的“863”计划重点项目, 是中国第一台太阳能塔式热发电的示范电站^[1-2]。主要探索大规模低成本商业化电站的技术途径, 为我国太阳能热发电技术的发展奠定技术基础^[1]。吸热器是塔式太阳能热发电的关键设备之一, 其性能直接影响整个电站的安全可靠性和经济性。特别是水/蒸汽过热型腔式吸热器, 由于预热面、过热面和蒸发受热面同在 1 个腔室中, 同时太阳能热流密度的极端不均匀和随时间变化的特点, 该类吸热器设计和运行已成为世界性的难题。本文针对大汉兆瓦级塔式太阳能热发电系统的过热型腔式吸热器展开仿真研究, 建立了大汉兆瓦级塔式太阳能热发电过热型腔式吸热器的全工况动态仿真数学模型, 模拟了腔式吸热器的动、静态特性, 为大汉塔式太阳能热发电电站过热型吸热器设计及整个电站系统运行策略的选择奠定了基础。

1 大汉兆瓦级太阳能塔式热发电站

大汉兆瓦级太阳能塔式热发电站由集热岛、热能储存岛和常规岛构成^[3]。集热岛包括定日镜场、吸热器系统和吸热塔。吸热器为过热型腔式吸热器, 吸热塔高 118 m, 过热型腔式吸热器安装在吸热塔 92 m 标高处。热能储存岛由高温子系统、低温子系统组成^[3], 高温蓄热工质为导热油。低温子系统是 1 个 100 m³ 的饱和蒸汽蓄热器, 工质为饱和水蒸气。常规岛由 1 台 8.4 t/h 的燃油辅助锅炉和 1.5 兆瓦的汽轮发电机组构成^[4]。整个电站的热力系统如图 1 所示^[5]。系统的设计参数如表 1 所示。

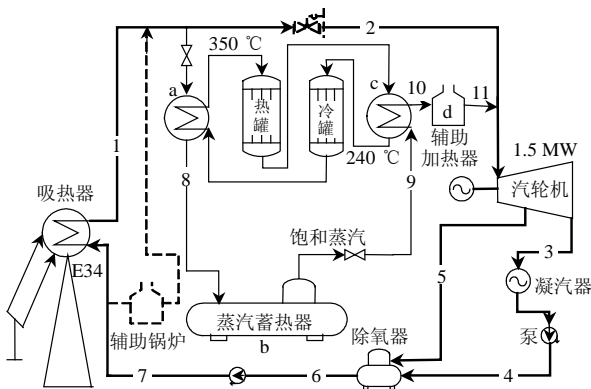


图1 大汉电站系统图

Fig. 1 Schematic of the Dahan power plant system

表1 大汉太阳能电站的主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of Dahan solar power tower plant

| 设计点 | 温度/℃ | 压力/MPa |
|-----|------|---------|
| 1 | 400 | 2.8 |
| 2 | 390 | 2.35 |
| 3 | 38 | 0.006 7 |
| 4 | 40 | 0.24 |
| 5 | 236 | 0.316 |
| 6 | 104 | 0.12 |
| 7 | 105 | 4.1 |
| 8 | 260 | 2.6 |
| 9 | 224 | 2.5 |
| 10 | 320 | — |

2 吸热器及其数学模型

2.1 吸热器

大汉兆瓦级塔式太阳能热发电站过热型腔式吸热器是由西安交通大学开发研制的,采用强迫循环技术,吸热器呈六棱柱型,采光口尺寸为 5 m×5 m,吸热器高为 5.5 m,吸热器深度为 7 m。在吸热器腔式内部布置有预热受热面、蒸发受热面和过热受热面,汽包布置在吸热器的顶部。预热受热面在吸热器腔式的底部布置,蒸发受热面布置在朝向吸热器开口的 2 侧面,过热受热面布置在蒸发受热面的前面,吸热器的汽水流程如图 2 所示。吸热器

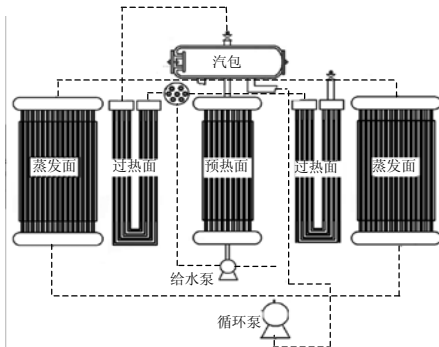


图2 吸热器汽水流程

Fig. 2 Flow chart of receiver

额定产汽量为 8 t/h, 过热蒸汽压力为 2.8 MPa, 温度为 400 ℃。

2.2 吸热器的仿真

2.2.1 汽包模型^[6-7]

质量守恒方程:

$$\frac{d(\rho'V_{l-drum} + \rho''V_{g-drum})}{d\tau} = D_{fw} + D_{rise2} - D_{down} - D_{drum} - D_{b-down} \quad (1)$$

总能量守恒方程:

$$\frac{d(\rho'V_{l-drum}H' + \rho''V_{g-drum}H'')}{d\tau} = D_{fw}H_{fw} + D_{rise2}xH''_{rise2} + D_{rise2}(1-x)H'_{rise2} - D_{down}H_{down} - D_{drum}H'' - D_{b-down}H' - Q_{m-d} \quad (2)$$

汽侧质量守恒方程:

$$\frac{d(\rho''V_{g-drum})}{d\tau} = D_{rise2}x - D_{drum} - D_{con} + D_{evap} \quad (3)$$

汽侧能量守恒方程:

$$\frac{d(\rho''V_{g-drum}H'')}{d\tau} = D_{rise2}xH''_{rise2} - D_{drum}H'' - D_{con}H' + D_{evap}H'' + Q_{g-m} \quad (4)$$

$$V_{g-drum} + V_{l-drum} = V_{drum} \quad (5)$$

蒸汽的附加凝结量:

$$D_{con} = \frac{D_{fw}(H' - H_{fw})}{H'' - H'} \quad (6)$$

式中: D_{fw} 为进入汽包的给水流量; H_{fw} 为进入汽包给水的焓值; D_{con} 为汽包内蒸汽凝结流量; D_{evap} 为汽包内附加蒸发流量; V_{drum} 为汽包总容积; D_{drum} 为流出汽包的蒸汽流量; D_{down} 为进入下降管的流量; D_{rise2} 为上升管来流进入汽包的流量; V_{g-drum} 为汽包内汽空间的容积; V_{l-drum} 为汽包内水空间的容积; D_{b-down} 为汽包的排污流量; “'”、“''” 分别代表水和汽的参数。

2.2.2 蒸发受热面数学模型

蒸发受热面中热水段、蒸发段工质的流型随吸热器运行工况的不同而不同,工质传热工况随工质流型的不同而不同,在蒸发受热面各段的换热计算中,工质与管壁的换热系数由工质的物性参数和工质在蒸发受热面内的流型决定,因此,在蒸发受热面建模过程中,蒸发受热面的换热系数按单相流体强迫流动、两相工质强迫流动核态换热和两相工质强迫流动欠液区换热 3 种换热形式进行计算^[8-10]。同时假设:蒸发受热面管子各横截面上流体特性均匀;通过每根蒸发受热面管子的流量相同;忽略管

壁和工质的轴向导热；分段内工质压力均匀一致，并由出口压力作为特征参数。

质量平衡方程：

$$\frac{d(\rho V)}{d\tau} = D_1 - D_2 \quad (7)$$

式中： D_1 、 D_2 分别为受热面的进出口流量； ρ 为受热面中工质密度； V 为受热面的管内容积。

能量平衡方程：

$$\frac{d(M_j T_j)}{dt} = Q_f - Q_a \quad (8)$$

$$\frac{d(M_a h)}{dt} = M_1 H_1 - M_2 H_2 + Q_a \quad (9)$$

$$Q_a = \alpha_1 S (T_j - T_a) \quad (10)$$

式中： Q_a 、 Q_f 分别为管壁对工质的传热量、太阳对受热面的辐射热量； M_j 、 T_j 分别为受热面的金属质量和温度； M_a 、 h 分别为管内工质的质量和焓； H_1 、 H_2 分别为进出口焓； α_1 为换热系数； S 为换热面积； T_a 为工质温度。

单相管内强制对流换热，换热系数直接采用贝尔特-迪图思公式计算：

$$\alpha_{\text{cht}} = \frac{\lambda}{d} 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (11)$$

式中： λ 为蒸汽的导热系数； Re 为雷诺数； Pr 为按工质温度和受热面金属温度计算的普朗特数，取二者中的较小者； d 为受热面的当量直径。

核态换热系数的计算^[11]：

$$\alpha_1 = \alpha_{\text{hf}} + \alpha_{\text{dl}} \quad (12)$$

$$\alpha_{\text{hf}} = 0.001 22 \left[\frac{0.79 \lambda' C_p'^{0.45} \rho'^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu'^{0.29} \gamma^{0.24} \rho''^{0.24}} \right] \Delta t_{\text{gr}}^{0.24} \Delta p_{\text{gr}}^{0.7} s \quad (13)$$

$$s = [1 + 2.53 \times 10^{-6} (Re)_{\text{lk}}^{1.17}]^{-1} \quad (14)$$

$$(Re)_{\text{lk}} = \left[\frac{D_2 (1-x)d}{\mu'} \right] F^{1.25} \quad (15)$$

$$\frac{1}{X_{\text{tt}}} \leq 0.1, \quad F = 1.0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{X_{\text{tt}}} > 0.1, \quad F = 2.35 \left(\frac{1}{X_{\text{tt}}} + 0.213 \right)^{0.736} \quad (17)$$

$$X_{\text{tt}} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.05} \left(\frac{\mu'}{\mu''} \right)^{0.1} \quad (18)$$

$$\alpha_{\text{dl}} = 0.023 \frac{\lambda'}{d} \left[\frac{D_2 (1-x)d}{\mu'} \right]^{0.8} \left[\frac{\mu' C_p'}{\lambda'} \right]^{0.4} F \quad (19)$$

式中： α_{hf} 、 α_{dl} 分别为泡态沸腾和对流放热系数； D_2 为工质流量； σ 为表面张力系数； γ 为气化潜热； μ 为工质的粘度； Δt_{gr} 、 Δp_{gr} 分别为管壁的过热度(壁

面温度与工质饱和温度的差值)和对应 Δt_{gr} 的饱和压力差； S 为对泡态沸腾抑制系数； x 为质量含汽率； F 为与马丁勒里参数相关的系数； $(Re)_{\text{lk}}$ 为两相雷诺数； X_{tt} 为马丁勒里参数；“'”、“''”分别代表水和汽的参数。

强迫流动欠液区换热系数^[3]为：

$D_2 > 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，

$$y = 1 - 0.1 \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)^{0.4} (1-x)^{0.4} \quad (20)$$

$$Nu = 0.023 \left(\frac{\rho' w_2 d}{\rho'' \nu''} \right)^{0.8} (Pr'')^{0.4} \left[x + \frac{\rho''}{\rho'} (1-x) \right]^{0.8} y \quad (21)$$

$$\alpha_1 = \lambda'' / dNu \quad (22)$$

$D_2 \leq 800 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时，

$$\alpha_1 = 1.16 \left[\frac{12.5 + 0.025 D_2}{(x + 0.001) - X_{\text{eh}}} - (4650 - 8\rho w_2)(x - X_{\text{eh}}) + 1240 \right] \quad (23)$$

式中： X_{eh} 恶化点的质量含汽率； Nu 为努谢尔特数； y 为修正因子；其他变量含意同前。

2.2.3 单相受热面模型^[12-14]

对于过热型吸热器，预热受热面和过热受热面工质是不发生相变的，工作机制基本相同，因此，对于预热受热面和过热受热面建立通用模型。

能量守恒方程：

$$\frac{d(MH)}{d\tau} = D_1 H_1 - D_2 H_2 + Q \quad (24)$$

式中： M 为当量蒸汽质量，其计算由式(25)得到，即

$$M = \rho V + \frac{T}{T_m} \frac{c_m}{c_s} M_m \quad (25)$$

管内工质和金属管壁之间的换热方程为

$$Q = KD_2^n (T_m - T_2) \quad (26)$$

式中： Q 为蒸汽与金属管壁的换热量； c_m 为过热器金属管的比热容； c_s 为过热蒸汽的比热容； T_m 为金属管壁温度； T 为过热蒸汽温度，下标 1、2 分别表示入口和出口； K 为金属管壁对蒸汽的放热系数。

3 仿真结果

3.1 受热面能流密度

太阳能辐射量是腔式吸热器受热面模型的关键输入量，本文根据大汉塔式太阳能电站的地理位置、定日镜结构尺寸、面型及定日镜场的布置参数、吸热器位置和结构尺寸，利用镜场仿真模型计算得到了各受热面的太阳能辐照值。图 3 为 2009 年 9 月 9 日各受热面的能流密度随时间的变化图。

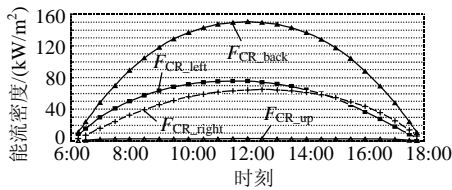


图3 吸热器各受热面能流随时间变化
Fig. 3 Variation of energy flux on different surface with time

3.2 吸热器仿真实验及特性分析

3.2.1 大汉兆瓦级腔式吸热器的静态特性

根据大汉兆瓦级太阳能塔式热发电系统过热型腔式吸热器的具体结构和工质流程,建立了大汉塔式太阳能电站吸热器的全工况模型,并成功地运

用在以 STAR-90 仿真系统^[15-16]为平台的大汉兆瓦级塔式太阳能热发电站仿真系统中。STAR-90 系统是由保定华仿科技有限公司开发的仿真支撑系统,采用图形化建模方式,它既是模型组态平台,也是模型运行平台。本文进行了大汉兆瓦级过热型腔式吸热器的静态模拟实验。表2是2009年9月9日12时36分的模拟结果。从表中可以看出,模拟得到的蒸汽压力、蒸汽流量、给水流量、给水压力均小于设计值,这是由于大汉兆瓦级太阳能塔式热发电站设计点的太阳直射辐射值(人为给定)为 900 W/m^2 , 而模拟时刻,太阳的直射辐射值为 800 W/m^2 。

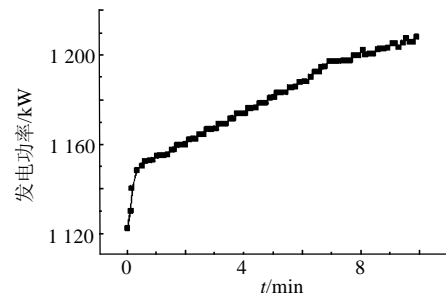
表2 太阳辐照度为 900 W/m^2 的设计值和辐照度为 800 W/m^2 模拟结果
Tab. 2 Simulation results with different solar radiation (900 W/m^2 and 800 W/m^2)

| 吸热器 | | | | 给水 | | | | 汽机入口 | | | | 发电 | | 太阳能 | | | | | |
|-------|--------|-----------|------|-------|--------|-----------|-----|-------|--------|-------|------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|
| 温度/°C | 压力/MPa | 流量/(kg/h) | | 温度/°C | 压力/MPa | 流量/(kg/h) | | 温度/°C | 压力/MPa | 功率/kW | | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | | | | |
| 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | 设计值 | 仿真值 | | | | |
| 400 | 401 | 2.8 | 2.66 | 8400 | 6572 | 105 | 106 | 4.1 | 3.98 | 8400 | 6568 | 390 | 400 | 2.35 | 2.35 | 1500 | 1122 | 900 | 800 |

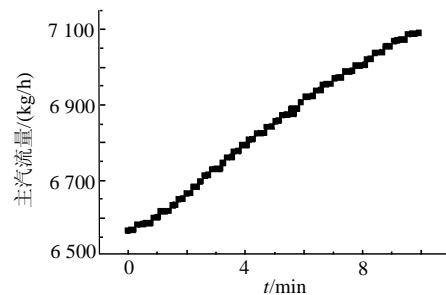
3.2.2 大汉兆瓦级腔式吸热器的动态特性

本文通过太阳辐照阶跃扰动实验^[17-19]测试所建腔式吸热器模型动态特性的优劣。为了测试模型的稳定性和动态特性,随机选定2009年9月9日12时36分的模拟工况为实验初始工况,进行太阳能辐射度扰动实验,且吸热器给水控制保持自动,汽轮机调门开度保持不变,过热汽喷水阀关闭。图4为太阳能辐射度阶跃增加10%,功率、汽温、汽压和蒸汽流量的变化情况。图5为太阳能辐射度阶跃降低10%,功率、汽温、汽压和蒸汽流量的变化情况。

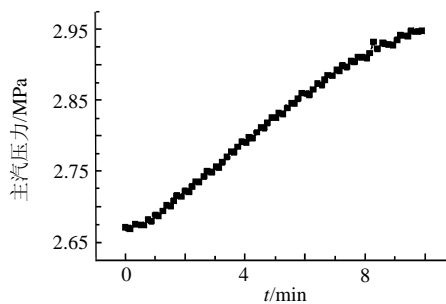
表3给出了扰动仿真过程每间隔1min的仿真值。从太阳能辐照度的扰动实验看,无论是辐照度增加10%还是降低10%,主汽压力和流量是逐渐变化的,而主汽温度和发电功率出现了快速的响应,且在开始的15s左右,变化幅度较大。压力、流量和功率的变化与太阳能辐射度阶跃扰动方向一致,而汽温则不然,在辐照度增加10%的阶跃



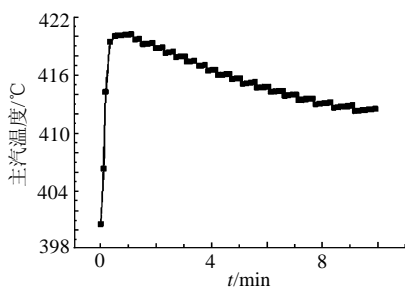
(b) 发电功率



(c) 主汽流量



(d) 主汽压力



(a) 主汽温度

图4 太阳能辐射度阶跃增加10%
Fig. 4 Solar radiation increases by 10%

表 3 太阳能辐射度阶跃±10%时，各变量每分钟间隔的仿真值
Tab.3 Variation of simulation results with solar radiation change

| t/min | 压力/MPa | | 功率/kW | | 流量/(kg/h) | | 温度/℃ | |
|-------|--------|------|-------|-------|-----------|-------|------|------|
| | +10% | -10% | +10% | -10% | +10% | -10% | +10% | -10% |
| 0 | 2.66 | 2.66 | 1 122 | 1 122 | 6 565 | 6 573 | 401 | 401 |
| 1 | 2.68 | 2.65 | 1 154 | 1 080 | 6 598 | 6 543 | 420 | 382 |
| 2 | 2.72 | 2.58 | 1 160 | 1 071 | 6 652 | 6 458 | 419 | 384 |
| 3 | 2.77 | 2.53 | 1 166 | 1 066 | 6 711 | 6 394 | 417 | 385 |
| 4 | 2.81 | 2.49 | 1 172 | 1 062 | 6 768 | 6 330 | 416 | 387 |
| 5 | 2.86 | 2.44 | 1 178 | 1 058 | 6 822 | 6 273 | 414 | 388 |
| 6 | 2.90 | 2.41 | 1 183 | 1 055 | 6 872 | 6 225 | 413 | 389 |
| 7 | 2.94 | 2.38 | 1 190 | 1 052 | 6 918 | 6 183 | 412 | 390 |
| 8 | 2.97 | 2.35 | 1 193 | 1 050 | 6 959 | 6 148 | 411 | 391 |
| 9 | 3.00 | 2.33 | 1 195 | 1 039 | 6 996 | 6 116 | 410 | 391 |
| 10 | 3.03 | 2.31 | 1 197 | 1 036 | 7 029 | 6 090 | 410 | 392 |

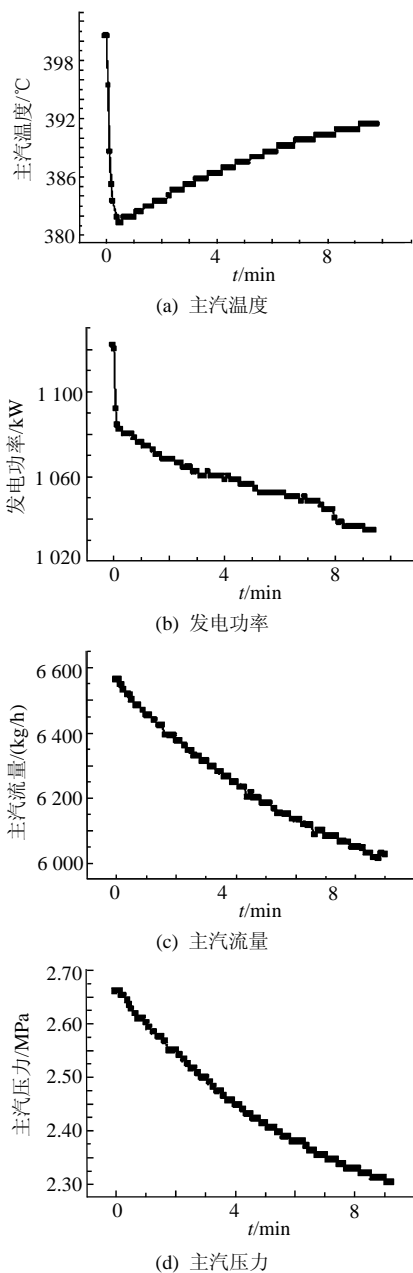


图 5 太阳能辐射度阶跃降低 10%
Fig.5 Solar radiation drops by 10%

扰动时，汽温开始快速增加到某一值，然后逐渐降低，最后趋于稳定在高于初始值的某一温度。在辐照度减少 10%的阶跃扰动时，汽温开始快速降低到某一值，然后逐渐升高，最后趋于稳定在低于初始的某一温度。出现这一现象是因为蒸汽温度不仅受太阳能辐照度的影响，而且受蒸汽流量的影响，而蒸汽流量的变化又滞后于太阳能辐照度的变化的缘故。

4 结论

大汉电站是中国第一台太阳能塔式热发电的示范电站。本文依照质量、能量、动量守恒原理和热力学、传热学、流体力学等基本关系式，利用模块化建模方法在 star-90 仿真平台上建立了大汉兆瓦级塔式太阳能热发电过热型腔式吸热器的全过程仿真模型，并进行了太阳能辐照的阶跃扰动实验。仿真实验揭示的过热型腔式吸热器的动态特性，对于以水/蒸汽为工质的过热型吸热器塔式太阳能热发电系统的设计以及运行控制策略的选择具有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Wang Zhifeng, Yao Zhihao, Dong Jun. The design of a 1 MW solar thermal tower plant in Beijing, China[C]/Proceedings of Ises Solar World Congress: Solar Energy and Human Settlement, 2007.
- [2] Yin Zhiqiang, Wang Zhifeng. The development strategy research series of Chinese renewable energies[J]. Solar Energy, 2008(86): 7.
- [3] Jin Hongguang, Han Wei, Wang Zhifeng, et al. 1MW Dahan solar tower thermal cycle[R]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academic of Sciences, 2007: 15-20.
- [4] Zhang Hongli, Wang Zhifeng, Guo Minghuan. Cosine efficiency distribution of heliostats field of solar thermal power tower plants [C]/Power and Energy Engineering Conference, 2009, Wuhan, China.
- [5] Yao Zhihao, Wang Zhifeng, Lu Zhenwu, et al. Modeling and simulation of the pioneer 1MW solar thermal central receiver system

- in China[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(11): 2437-2446.
- [6] 雷玉兰. 自然循环锅炉炉内过程的仿真模型[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- Lei Yulian. Modeling and simulation of in-boiler process of naturally circulation boiler[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009(in Chinese).
- [7] 章臣樾. 锅炉动态特性及数学模型[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987: 31-45.
- Zhang Chenyue. Boiler dynamic characteristics and its mathematical [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1987: 31-45 (in Chinese).
- [8] Xu Ershu, Yan Qin, Zhu Huanlai. Moving-boundary full scope simulation model of ultra-supercritical once-through boiler [J]. *Modelling, Identification and Control*, 2009, 7(4): 357-364.
- [9] 徐二树, 李恕康, 孙志英, 等. 大容量超临界直流锅炉炉内过程全工况实时仿真数学模型及动态特性[J]. *动力工程*, 2003, 23(4): 2500-2505.
- Xu Ershu, Li Shukang, Sun Zhiying, et al. Mathematical model and dynamic characteristic of inter-boiler process of big capacity once-through boiler[J]. *Power Engineering*, 2003, 23(4): 2500-2505(in Chinese).
- [10] 王广军, 何祖威, 陈红. 基于神经网络和过程机制特性的锅炉蒸发系统仿真[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(11): 65-68.
- Wang Guangjun, He Zuwei, Chen Hong. Boiler evaporation system simulations based on neural network and process mechanism characteristic[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(11): 65-68(in Chinese).
- [11] 周强泰. 两相流动和热交换[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 138-202.
- Zhou Qiangtai. Two-phase flow and heat exchange [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1990: 138-202(in Chinese).
- [12] 任挺进, 谢茂清, 李志刚, 等. 锅炉单相受热面链式建模新方法[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 175-178.
- Ren Tingjin, Xie Maoqing, Li Zhigang, et al. A new method of chain modeling of single-phase heating surface of boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(3): 175-178(in Chinese).
- [13] 范永胜, 睦喆, 姜学智, 等. 一种高精度的锅炉单相区段集总参数动态修正模型[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 20(1): 50-54.
- Fan Yongsheng, Sui Zhe, Jiang Xuezhi, et al. A high-precision modified lumped-parameter dynamic model applied to one-phase boiler sections[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2000, 20(1): 50-54(in Chinese).
- [14] 胡剑辉, 林汝谋. 联合循环中蒸汽底循环系统稳态全工况特性模型及计算分析[J]. *工程热物理学报*, 1997, 18(3): 277-280.
- Hu Jianhui, Lin Rumou. Static off-design performance simulation of bottom cycle in combined cycle[J]. *Journal of Engineering Thermal Physics*, 1997, 18(3): 277-280(in Chinese).
- [15] 高建强, 马良玉, 王兵树, 等. 450t/h 循环流化床锅炉机组动态仿真模型研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(11): 241-245.
- Gao Jianqiang, Ma Liangyu, Wang Bingshu, et al. Study on dynamic, simulation model for 450 T/H circulating fluidized bed boiler [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(11): 241-245(in Chinese).
- [16] 崔凝, 王兵树, 高建强, 等. 大容量余热锅炉动态模型的研究与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(19): 103-108.
- Cui Ning, Wang Bingshu, Gao Jianqiang, et al. Study and application on a dynamic model for the large capacity heat recovery steam generator[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(19): 103-108(in Chinese).
- [17] 曾德良, 赵征, 陈彦桥, 等. 500 MW 机组锅炉模型及试验分析[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(5): 149-152.
- Zeng Deliang, Zhao Zheng, Chen Yanqiao, et al. A practical 500MW boiler dynamic model analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(5): 149-152(in Chinese).
- [18] 田亮, 曾德良, 刘吉臻, 等. 简化的 330 MW 机组非线性动态模型[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(8): 180-184.
- Tian Liang, Zeng Deliang, Liu Jizhen, et al. A simplified non-linear dynamic model of 330 MW unit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(8): 180-184(in Chinese).
- [19] 房方, 谭文, 刘吉臻. 机炉协调系统的非线性输出跟踪控制[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 147-151.
- Fang Fang, Tan Wen, Liu Jizhen. Nonlinear output tracking control for the coordinated system of boiler-turbine units[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(1): 147-151(in Chinese).



徐二树

收稿日期: 2010-03-23。

作者简介:

徐二树(1962), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为太阳能热发电, xuersu@sohu.com。

(责任编辑 张媛媛)